



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Modellering af vandkvaliteten i Mariager Fjord

Larsen, Torben

Publication date:
1998

Document Version
Accepteret manuscript, peer-review version

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Larsen, T. (1998). *Modellering af vandkvaliteten i Mariager Fjord*.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

4.5.1998.

Notat om

Modellering af vandkvaliteten i Mariager Fjord

Indledning

Herværende notat er udarbejdet på foranledning af Miljøkontoret, Nordjyllands Amt, ved biolog, cand. scient. Finn Andersen og civilingeniør Kirsten Broch. Notatet er skrevet af Torben Larsen.

Formålet med notatet er, at beskrive, hvilke principper og metoder, som vil kunne tages i anvendelse ved en modellering og vurdering af hvilke forbedringer af vandkvaliteten (eutrofieringen), som vil kunne opnås ved en reduktion af tilførslen af næringssalte til fjorden.

Lidt om status for anvendelse af modeller for fjorde

Fra midten af 70'erne blev der i de følgende 10 – 15 år udført recipientundersøgelser, som omfattede modellering af vandkvalitet i stort set alle danske fjorde. En af største og i øvrigt første var *Limfjordsundersøgelsen 1974 - 75*. Det faglige udgangspunkt for disse undersøgelser, hvor hovedvægten lå på virkningen med næringssalte, kan bl.a. findes i den metodik og i de modeller, der blev udviklet i forbindelse med forsøget på at løse forureningsproblemerne med de store søer i det centrale Nordamerika.

Der eksisterer ikke i Danmark en samlet evaluering af denne ret store indsats fra denne periode, men indtrykket er, at resultaterne ikke var særligt tilfredsstillende. Bemærkelsesværdigt er det, at undersøgelserne stort set ikke havde indflydelse på de udledningskrav til næringssalte, som blev fastsat i de recipientkvalitetsplaner, som i midten af firserne blev vedtaget af amtsrådene landet over.

Det må formodes, at en væsentlig årsag til, at der trods alt i denne periode blev udført vandkvalitetsmodellering for de fleste danske fjorde, er at disse modeller tilsyneladende giver logiske og entydige svar på de stillede spørgsmål, der underbygges af omfattende teknisk dokumentation.

Vandmiljøplanen fra 1987 blev som bekendt vedtaget på et meget spinkelt fagligt grundlag. I en ultrakort version var den grundlæggende tankegang i denne plan den, at såfremt man kunne halvere tilførslen af næringssalte til havet, ville man vende tilbage til den belastning og dermed den vandkvalitet, man havde haft i halvtredserne. Der lå ingen resultater fra en modellering af vandkvaliteten i de danske farvande som baggrund for beslutningen om planen. Det er velkendt, at denne målsætning for planen ikke blev opnået, fordi det ikke var muligt, at reducere den samlede udledning af kvælstof. Den netop vedtagne nye vandmiljøplan bygger ligeledes heller ikke på modelleringer for så vidt angår den marine del.

Det er påfaldende, at der ikke i forbindelse med de to store forskningsprogrammer finansieret af Miljøministeriet, nemlig *Havforskningsprogram 90* og det efterfølgende *Strategiske Miljøforskningsprogram* har været udført forskningsprojekter til belysning af, hvorledes vandkvalitet i fjorde og i havet bedst kan modelleres.

På denne baggrund ser man, at der ikke kan henvises til en fast praksis for, hvorledes den aktuelle problemstilling skal angribes. Der kan derfor være mange synsvinkler på, hvad der er den bedste strategi.

Der skal ikke lægges skjul på, at udgangspunktet for dette notat er en tankegang om, at vi langt fra ved alt om, hvorledes fjordene fungerer som samlede fysiske, kemiske og biologiske systemer, og at vi derfor må disponere ud fra, hvad der konkret er observeret i fjordene, og at vi i mindre grad bør stole på komplekse modeller, fordi det tilsyneladende og til trods for, at mange delprocesser er velbeskrevne, endnu ikke er dokumenteret, at disse modeller kan simulere de faktiske forhold i fjordene nøjagtigere end enkle empiriske sammenhænge. En nærmere diskussion heraf gives bl.a. af *Seo og Canale, 1995*, samt *Larsen, 1997*.

Målsætningen for modellering af vandkvaliteten i Mariager Fjord

Målsætningen for en modellering af vandkvaliteten i Mariager Fjord er, at forudsige, hvorledes ændringen i de udvalgte tilstandsvariable vil blive over en længere tidsperiode f.eks. 5 - 10 år, hvor der samtidigt sker en gradvis reduktion af tilførslerne af næringssalte. Modelleringen må derfor ideelt set også omfatte de afledte ændringer af det kemisk/biologiske system, som må forventes at ske f.eks. ved at den iltfrie zone vil blive reduceret og at udbredelsen af ålegræs og muslingebanker vil forøges.

Definition af vandkvalitet

Vandkvalitet kan forstås og defineres på forskellig måde, hvilket ofte giver anledning til misforståelser. Forud for en undersøgelse omfattende modellering kan det derfor være nyttigt at få fastlagt præcist, hvorledes vandkvalitet skal forstås i det konkrete tilfælde.

Man kan skelne mellem følgende to former for beskrivelse af vandkvalitet:

- En generel kvalitativ beskrivelse baseret på alment anerkendte (sproglige) termer (f.eks. at plante- og dyreliv på den pågældende lokalitet er tydeligt forureningspåvirket).
- En kvantitativ (operationel) beskrivelse baseret på en eller flere målbare størrelser (også betegnet tilstandsvariable), f.eks. sigtedybde, årlig primærproduktion, koncentration af klorofyl, koncentration af næringssalte osv.

Det ligger i sagens natur, at der ikke generelt kan opstilles en entydig sammenhæng mellem de to former for beskrivelse gældende for alle typer af lokaliteter. Derimod vil man for den konkrete lokalitet (i dette tilfælde Mariager Fjord) bedre kunne formulere, hvorledes man omsætter en kvantitativ formulering til en operationel kvalitativ beskrivelse.

Når det gælder modellering af vandkvalitet vil man normalt udelukkende beskæftige sig med den operationelle beskrivelse af vandkvaliteten. I det følgende vil man derfor koncentrere sig om, hvorledes man ved modellering kan forudsige ændringer i de nævnte målbare størrelser. Det bør indskydes, at der kan være problemer med at formulere en målsætning for vandkvalitet baseret på flere variable på en gang, fordi disse normalt ikke er uafhængige af hinanden.

For Mariager Fjord skønnes (bl.a. med baggrund i de senere omtalte erfaringer inden for empirisk modellering) at følgende parametre vil kunne karakterisere vandkvaliteten:

1. Total koncentrationen af fosfor og kvælstof.
2. Sigtedybden
3. Koncentrationen af klorofyl A repræsenterende biomassen af planktonalger.
4. Primærproduktionen.
5. Inderfjordens samlede iltunderskud (eller eventuelt koten til det niveau, hvor iltkoncentrationen er mindre end 2 mg/l).
6. Den samlede biomasse af blåmuslinger i Inderfjorden.
7. Den samlede biomasse af ålegræs i inderfjorden.

Blandt disse parametre udvælges de parametre, hvis ændring ønskes bestemt ved modelleringen.

Typer af modeller

I dette afsnit vil alle de fremgangsmåder, som vil kunne forudsige, hvad en ændring af næringssaltbelastningen vil betyde, blive betegnet modeller. En model er således ikke nødvendigvis et stykke edb-software. Det vurderes, at følgende tre typer af en modellering vil være aktuelle i den foreliggende situation:

- En komparativ vurdering baseret på en sammenligning af Mariager Fjord med andre fjorde
- En empirisk (statistisk) modellering baseret på fjordens observerede respons på de naturlige eller menneskeskabte ændringer som er observeret via overvågningsprogrammets målinger.
- En deterministisk (kausal eller konceptuel) modellering, hvor alle væsentlige delprocesser er medtaget.

Idet følgende vil disse tre principper blive diskuteret.

Sammenligning med andre fjorde

Indledningsvis må det nævnes, at der, så vidt man er orienteret ikke i litteraturen, foreligger en sammenstilling af eksempler på hvilke forbedringer, der har kunnet opnås ved en nedsættelse af næringsaltbelastningen for fjorde.

For søer eksisterer der et klassifikationssystem, som relativt groft karakteriserer søernes grad af eutrofiering, dvs. i hvilken grad den enkelte sø er påvirket af næringssalte (primært fosfor). På tilsvarende vis ville det formentligt være muligt at klassificere tilstanden i danske (og nordeuropæiske fjorde) ud fra et antal nøgletal som f.eks. overfladebelastning (tilført mængde næringssalte pr. arealenhed af fjorden), topografiske data, vandskifte m.v.

Såfremt der havde eksisteret et sådant klassifikationssystem, kunne man få et groft, men alligevel sikkert indtryk af, hvor stor en reduktion af belastningen, der ville være nødvendig for at opnå en bedre tilstand i fjorden.

Når et sådant klassifikationssystem ikke allerede eksisterer, skyldes det formentlig, at forholdene i fjordene er betydeligt mere komplicerede end i søerne. For det første betyder vandskiftet med det nærliggende havområde, at det ikke alene er de tilførte stofmængder, som er afgørende for de disponible mængder af næringssalte, men også at koncentrationsforholdene i havområdet indgår. For det andet er det, i modsætning til søer, hvor det kun er fosfor, som er begrænsende, normalt både fosfor og kvælstof, som er begrænsende for primærproduktionen i fjorde.

Alt i alt vil en klassifikation af fjorde derfor være mere vanskelig og usikker end en klassifikation af søer, fordi der således vil indgå flere nøgletal, når der er tale om fjorde. Da der endvidere i Danmark kun er et begrænset antal fjorde til rådighed vil det formentlig også være nødvendigt at indrage data fra andre lande. Men uanset denne usikkerhed burde forsøges gøres, og der er ingen tvivl om, at der ville komme et positivt resultat ud af det. Det, der er vanskeligt at forudsige, er, hvor differentieret en klassifikation det vil være muligt at opnå.

Fordelen ved metoden er, at den baserer sig på en vurdering af eksisterende tilstande og ikke på en vurdering af ændringer. Det vil ofte være vanskeligt, at vurdere om en ændring (f.eks. som følge af en belastningsændring) tidsmæssigt er afsluttet. **Ulempen** er, at metoden er relativt grov.

Empiriske modeller

Empiriske modeller, eller som de også betegnes blackbox-modeller (f.eks. multipel regression, Box-Jenkins modeller, Kalman filtre og neurale netværksmodeller osv.), bygger på simple matematiske formeludtryk, som kan udtrykke sammenhængen mellem et antal uafhængige input-variable (de styrende påvirkninger) og en eller flere afhængige output-variable (her vandkvaliteten). Der eksisterer et omfattende teoretisk baggrundsmateriale, som blandt andet giver mulighed for at bestemme usikkerheden ved modelleringen.

En empirisk modellering bygger i princippet på de informationer, som ligger i de "naturlige" variationer i belastningerne og tilhørende respons herpå i fjordene, dvs. en form for fuldskala forsøg. Svagheden ved princippet er, at man ikke kan vide, om de fundne sammenhænge gælder uden for det variationsinterval, som har været brugt ved kalibreringen af formlerne.

Når det gælder eutrofieringen af søer foreligger der en omfattende erfaring med simple empiriske modeller både her i Danmark og i udlandet. Man skal her henvise til den schweiziske forsker *Vollenweider, 1975* og de danske erfaringer beskrevet af *Windolf et al, 1995*. For fjorde og havet er man kun bekendt med en svensk undersøgelse (*Wallin et al, 1992*), som beskæftiger sig med virkningen af havdambrug.

Rapporteringen af overvågningsprogrammerne for de marine områder (*DMU, 1996*) indeholder en række korrelationsanalyser, der dog ikke fuldt ud er ført så langt, at de kan betegnes egentlige modeller, som kan anvendes ved en konsekvensanalyse. I flere af analyserne viser det sig, at fjorden opholdstid er en afgørende parameter. Desværre har man i analyserne anvendt den såkaldte ferskvandsopholdstid (volumen divideret med ferskvandstilførsel) i stedet for fjordens "rigtige" opholdstid, hvor også udvekslingen med havet er medtaget. Der er grund til at formode, at dette kunne have gjort de pæne korrelationskoefficienter endnu pænere.

Når det gælder fjorde har forfatteren til herværende notat igennem nogle år arbejdet med empiriske modeller (*Larsen m.fl. 1997; Larsen og Hansen, 1998*). For Mariager Fjord har det

været muligt at opstille empiriske modeller, som måned for måned har kunnet beskrive følgende afhængige variable (tilstandsvariable):

- Sigtedydbden
- Klorofyl A (repræsenterende den samlede biomase af planktonalger)
- Total-kvælstof
- Total-fosfor.

Når det gælder input-variable til disse modeller viste det sig (ved trial and error), at følgende variable alle bidrog til at forbedre korrelationen mellem målte og beregnede værdier:

- De samlede (eksterne) tilførsler af kvælstof
- Den samlede (eksterne) tilførsler af fosfor
- Koncentrationen af total-kvælstof i Kattegat
- Koncentrationen af total-fosfor i Kattegat
- Indfaldet af lys
- Vandtemperaturen
- Tilførslen af ferskvand
- Saltholdigheden i fjorden
- Saltholdigheden i Kattegat

Ved et forsøg på en sammenhængende empirisk modellering mellem Mariager, Randers, Horsens, Haderslev og Odense fjorde har det imidlertid kun vist sig at været muligt at modellere totalkvælstof og totalfosfor. Da disse fjorde har et meget forskelligt vandskifte, har man som input benyttet følgende 4 størrelser:

- Den potentielle koncentration af kvælstof i fjorden
- Den potentielle koncentration af fosfor i fjorden
- Vandtemperaturen
- Lysindfaldet

De omtalte "potentielle koncentrationer" for henholdsvis kvælstof og fosfor beregnes ved hjælp af en boksmode for fjorden og udtrykker den koncentration, som ville have været i fjorden, såfremt det pågældende næringssalt havde været et konservativt stof. Disse "potentielle koncentrationer" beregnes løbende for hele simuleringsperioden ud fra målinger af tilførslerne, koncentrationerne i det nærliggende havområde og vandskiftet (bestemt af saliniteten i havet og i fjorden samt tilførslen af ferskvands).

Det har derefter været muligt at opstille (kalibrere) nogle enkle sammenhænge mellem de beregnede modelkonstanter og karakteristiske topografiske data for 4 af de nævnte fjorde. Hele princippet blev derefter afprøvet (valideret) på den fjord, som ikke havde været anvendt i kalibreringen, og det viste sig muligt at opnå en god overensstemmelse mellem målte og beregnede værdier.

På baggrund af disse erfaringer synes det rimeligt at konkludere, at når det gælder modellering af de totale næringssaltkoncentrationer, kan de empiriske modeller sandsynligvis også anvendes uden for det variationsområde, som er observeret for Mariager Fjord, idet modellen med rimelig nøjagtighed gælder for alle de 5 nævnte fjorde.

Fordelene ved anvendelse af empiriske modeller er at de udnytter det eksisterende datamateriale. **Ulemperne** er, at de kun dækker det naturlige variationsområde som har været observeret.

Deterministiske modeller

Deterministiske modeller vil normalt bestå af en sammenkobling af

- En vandskiftemodel indeholdende en hydrodynamisk model til beregning af vandbevægelsen samt en model af stoftransporten til beregning af transport og spredning. Når det drejer sig om 3-dimensionale beregninger er den hydrodynamiske model og stoftransportmodellen tæt sammenkoblede for bl.a. at kunne medtage virkningen af saltindholdigheden (densitetsstrømme).
- En vandkvalitetsmodel for beregning af vandkvalitetsprocesser i vandfase og i bundsedimenter.

En nøjere beskrivelse af denne modeltype kan ses i *Harremoes og Malmgren-Hansen, 1990*.

Disse modeller arbejder med en høj opløselighed i tid og sted for at kunne beskrive de indgående tilstandsvariable, som hvad man i matematikken kalder som differentiable størrelser. Betegnelsen deterministiske (eller kausale) dækker over, at beskrivelserne af alle delprocesser tager udgangspunkt i almindeligt anerkendte formeludtryk. I disse modeller indgår et relativt stort antal modelkonstanter (proceskonstanter), som i visse tilfælde må bestemmes ved en kalibrering af modellen mod målinger fra det område, som ønskes modelleret.

Vandkvalitetsmodellen benytter i høj grad resultater fra vandskiftmodellen, medens koblingen den modsatte vej normalt er uden betydning. Det er almindeligt accepteret, at de hydrodynamiske modeller er gode til at beskrive vandtransporten i fjord- og havområder. Man kan f.eks. nævne undersøgelserne vedrørende Storebæltsforbindelsen og Øresundsforbindelsen.

Der er derimod i fagkredse en betydelig skepsis over for vandkvalitetsmodellers evne til at beskrive og forudsige de kemisk biologiske forhold i recipienterne. Dette skyldes bl.a. de tidligere omtalte erfaringer fra 70'erne og 80'erne, samt det forhold, at der kun foreligger sporadiske eksempler, der dokumenterer modellernes egnethed, når det gælder en såkaldt validering, hvor man sammenligner beregnede resultater med målinger fra recipienten for perioder som ikke har været anvendt til kalibrering af modellen. For en nærmere diskussion se *Larsen, 1997*.

Nogle af de vigtigste årsager til, at en deterministisk modellering af vandkvaliteter er meget usikker, er bl.a., at primærproduktionen varierer på grund af variationer i sammensætningen af algerne, og at den såkaldte græsning fra zooplankton, muslinger m.v. er vanskelig at beskrive. Til trods for, at der gennem de seneste årtiers forskning er opnået en omfattende viden om de processer, der styrer stofudvekslingen mellem bunden og vandfasen, er der fortsat usikkerhed om, hvorledes denne viden skal implementeres, når det gælder et samlet fjordsystem. Der er bl.a. fortsat en markant forskel på den denitrifikation som kan måles i bundsedimenterne og den samlede kvælstoffjernelse, som kan opgøres via massebalancen for vandfasen. Det må derfor anbefales, at man forud for en eventuel modellering af Mariager Fjord,

sikrer sig, at den pågældende model har vist sig at kunne kalibreres og valideres ved en eller flere andre fjorde.

En deterministisk model ville være nødvendig, hvis man ønsker at vurdere meget stedslige differentierede løsninger langs fjorde. Hvis man f.eks. mente (og dette er kun et eksempel), at der skulle være en bedre rensning af spildevandet i Horbro end i Mariager ville det kræve en deterministisk model at se virkningen heraf.

Fordelen ved en deterministisk modellering er, at resultaterne er entydige og differentierede i tid og sted. **Ulemperne** er, at der kræves omfattende feltnmålinger for en nøjagtig kalibrering, samt at vellykkede eksempler på tilbundsgående valideringer af disse modeltyper er begrænsede. Usikkerheden på resultaterne kan være vanskelige at vurdere. Omkostningerne ved simuleringer over en længere årrække kan være betydelig.

Betydningen af det totale iltsvind i Inderfjorden i august 1997

Ved det meget bemærkelsesværdige totale iltsvind i Inderfjorden i slutningen af august 1997 døde stort set hele faunaen. Betydningen for floraen herunder den mikrobiologiske del er, så vidt man er orienteret, endnu ikke endeligt opgjort, men det må antages, at påvirkningen også her har været markant. Den naturlige genopretning af skaderne må forventes at tage adskillige år, og det er umiddelbart vanskeligt at skønne, hvor lang tid stofkredsløbet for næringssaltene stadig er påvirket af hændelsen. Der tænkes særligt på de meget store tranporter af næringsalte, der i løbet af året transporteres mellem bunden og vandfasen.

Såfremt systemet er helt eller delvist ude af ligevægt kan det være nytteløst at foretage detaljerede feltnmålinger med henblik på en modellering af vandkvaliteten. Det må derfor anbefales, at der forud for en eventuel modellering foretages en nøje analyse af, hvor langt fjorden er nået i genopretningen. Det vurderes her at være vigtigt, at der fokuseres på stofkredsløbet (massebalancerne), fordi dette er det centrale i modelleringen, der jo netop omhandler betydningen en ændring af belastningerne på massebalancen. Rent principielt må en massebalance være baseret på målinger. Det er vigtigt at gøre sig klart, at man ikke kan modellere sig ud manglende målinger.

Sammenfatning

1. Med baggrund i diskussionen af de tre forskellige modelleringsprincipper må det konkluderes, at det formentlig kun med den sammenlignende metode vil det være muligt, at forudsige den fulde virkning ved en reduktion af næringssalttilførslerne. En sådan forudsigelse vil være relativ grov.
2. Ved anvendelse af empiriske modeller vil man med baggrund i eksisterende målinger med rimelig nøjagtighed kunne forudsige ændringer i koncentrationer af totalkvælstof og totalfosfor samt klorofyl og eventuelt også i sigtedybde. Kombineret med en boksmode kan man formentlig opnå at differentiere mellem yder- og inderfjorden. Der kan kun med sikkerhed modelleres inden for det område, der svarer til det naturlige variationsområde i belastninger, som har forekommet de seneste ca. 10 år, og modelleringen vil ikke kunne medtage virkningen af en mere permanent ændring af det kemisk/biologiske system. Derfor vil en sådan modellering sandsynligvis undervurdere de forbedringer, som vil kunne opnås.
3. Deterministiske modeller kan formentlig modellere de samme størrelser, som de empiriske modeller, men vil til gengæld give et mere differentieret billede af, hvorledes forde-

lingen mellem fjordens forskellige afsnit er. Det vurderes, at de deterministiske modeller ikke vil føre til mere nøjagtige resultater end de empiriske modeller, medmindre der foretages en differentieret kalibrering med feltmålinger over en eller flere sæsoner. Ændringer i det kemisk/biologiske system kan disse modeller næppe forudsige.

4. Det må anbefales, at analysere nøje, om iltsvindet i inderfjorden i august 1997 vil kunne forstyrre en eventuel modellering af vandkvaliteten.

Referencer

Det har ikke i dette notat været tilstræbt, at opstille en komplet literaturliste for at underbygge de fremlagte synspunkter. De anførte referencer er blot medtaget for om nødvendigt, at supplere indholdet i de enkelte afsnit.

Harremoes, P., Malmgren-Hansen, A. (1990). Lærebog i Vandforurening. Polyteknisk Forlag.

Wallin, M., Håkanson, L., Persson, J. (1992). Belastningsmodeller för närsaltutsläpp i kustvatten. Nordiske Seminar- og Arbejdsrapporter 1992:502, Nordisk Ministerråd.

Vollenweider, R.A. (1975). Input-Output models with special reference the Phosphorus loading concept in limnology. Schweiz. Z. Hydrol. 38, 53-83.

Seo D-I, Canale R.P. (1995a). Performance, Reliability and Uncertainty of total phosphorus models for lakes - Part 1. Deterministic analysis. Water Research. Vol. 30, No 1 pp 83-94

Seo D-I, Canale R.P. (1995b). Performance, Reliability and Uncertainty of total phosphorus models for lakes - Part 2. Stochastic analysis. Water Research. Vol. 30, No 1 pp 83-94.

Larsen, T., Andersen F., Nielsen K. (1992), Mariager Fjords Næringsaltbalance. Vand og Miljø 2/1992.

Larsen, T., Høegh, N., Gunnarson, K., Hansen T.B. (1997). Vandkvalitetsmodel for Mariager fjord. Vand & Jord, 4.årgang juni 1997.

Larsen, T., Hansen T.B. (1998). Empiriske vandkvalitetsmodeller for fjorde. Accepteret til optagelse i Vand & Jord 1998.

Larsen, T., (1997). Some remarks on the calibration and validation of numerical water quality models. Proc. 1st Int. Conf. Measuring & Modelling in Environmental Pollution, Madrid, April 1997.

DMU (1996) Vandmiljøplanens Overvågningsprogram, Marine områder. Danske fjorde – status over miljøtilstand, årsagssammenhæng og udvikling. Faglig rapport fra DMU, nr. 179.

Windolf, J. m.fl. (1995). Model for kvælstof i søer. Vand & Jord nr. 5.